

面向宽带雷达直接接收的光子模数转换系统中的通道失配补偿

李成功, 钱娜, 邓安逸, 陈建平, 邹卫文*

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 智能微波光波融合创新中心(iMLic), 上海 200240

摘要 分析了采用多通道并行解复用架构的光子模数转换(PADC)样机用于宽带雷达接收时的通道失配问题, 建立了通道失配模型和失配量提取算法, 给出了通道失配补偿方法。对比分析角反射器和无人机的回波信号进行通道失配补偿前后的短时傅里叶变换(STFT)谱, 结果表明该补偿方法可有效抑制因样机多通道并行解复用架构所导致的固有幅度和延迟失配, 从而实现了 4 GHz 瞬时带宽的 X 和 Ka 波段的有效接收。在 X 和 Ka 波段下进一步开展了角反射器在近距离静态和远距离动态时的测试和对比实验, 结果表明该 PADC 样机均有效实现了间距约 10 cm 的角反射器一维成像测量。

关键词 光通信; 光子模数转换技术; 宽带雷达接收; 幅度失配; 延迟失配

中图分类号 TN957.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1606002

Channel-Mismatch Compensation of Photonic Analog-to-Digital Converter for Wideband Radar Direct Receiving

Li Chenggong, Qian Na, Deng Anyi, Chen Jianping, Zou Weiwen*

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Intelligent Microwave Lightwave Integration Innovation Center (iMLic), Department of Electronic Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract We analyze the channel mismatches in a multi-channel demultiplexing photonic analog-to-digital converter (PADC) applied in wideband radar receiving. We demonstrate a model of the channel mismatches and a method for extracting the mismatch information, and develop a channel-mismatch compensation algorithm. We analyze and compare the short-time Fourier transform spectra of the echo signals from the corner reflectors and the drone before and after the channel-mismatch compensation. The results confirm that the compensation algorithm can effectively suppress the intrinsic mismatches in the amplitude and delay mismatch caused by the multi-channel demultiplexing architecture of the PADC. The radar achieves wideband detection, covering a 4 GHz-bandwidth segment of the X-band and Ka-band signals. By comparison between the target detections of static and long-distance flying corner reflectors, we find that the compensated PADC effectively performs one-dimensional imaging of the corner reflectors installed 10 cm apart.

Key words optical communications; photonic analog-to-digital converter; wideband radar receiving; amplitude mismatch; delay mismatch

OCIS codes 060.5625; 230.0250; 250.4745; 000.2170

1 引 言

作为一种全天候、远距离、高精度的信息感知手段, 雷达系统在信息领域的应用也更加深入、广泛。为了实现复杂环境下的多功能信号处理能力, 下一

代雷达系统将工作在超高频和超宽带模式, 以获得高精度的探知水平和抗干扰能力。在采用线性调频(LFM)体制的宽带雷达信号处理中, 匹配滤波脉冲压缩方法在旁瓣抑制、距离分辨率和信噪比等方面都优于去斜率脉冲压缩方法, 但其对数字信号处

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-09; 录用日期: 2020-05-15

基金项目: 国家重点研究发展计划(2019YFB2203700)、国家自然科学基金(61822508, 61571292)

* E-mail: wzou@sjtu.edu.cn

理能力的要求也不断提高。为了实现宽带信号的高速、高精度接收和实时处理,模数转换技术(ADC)成为提升雷达信号处理能力的关键因素^[1]。目前,基于传统电子技术的雷达系统性能提升受到“电子瓶颈”的带宽限制。光子技术凭借其低抖动^[2-3]的特性获得了越来越多的关注,其中光子模数转换(PADC)技术得益于高精度和超宽带的优势^[4-6],在雷达探测中有望替代传统电模数转换器。Ghelfi等^[7]通过 PADC 技术直接采集高频段雷达信号并数字化,实现了对飞机等目标的准确测量,验证了 PADC 技术在下一代雷达接收中的应用潜力,然而受限于光采样时钟中被动锁模激光器的重复频率,所实现的雷达信号接收瞬时带宽小于 200 MHz。本课题组使用主动锁模激光器(AMLL)直接产生高速光采样时钟,基于多通道并行解复用架构研制了宽带 PADC 系统原理样机^[8-9]。该 PADC 样机采用光采样前端和电量化后端相结合的架构设计,有机融合了光子技术大带宽和电子技术高精度的优势。该 PADC 样机通过多通道并行解复用架构实现高速光脉冲序列的并行解复用,经过多通道信号的交织复合完成数据重构,实现该样机的高采样率,因此有效带宽和量化精度制约于各个通道间的幅度和延迟失配特性。本课题组在实验室环境下对该 PADC 样机的通道失配进行了分析^[10-11],初步实现了解复用过程中的失配补偿,但尚未开展宽带雷达回波信号的宽带接收和有效分析。

本文针对双波段宽带雷达信号接收的实际应用需求,分析了多通道并行解复用 PADC 样机中的通道失配问题,给出失配量提取和失配补偿的方法。分析和对比通道失配补偿前后 X 和 Ka 波段的短时傅里叶变换(STFT)谱,从而实现 4 GHz 瞬时带宽的有效接收。在外场环境下开展了角反射器在近距离静态和远距离动态时的测试和对比实验,通道失配补偿后的 PADC 样机实现了回波信号的宽带数字化接收,最终结合数字信号处理实现了间距约 10 cm 的角反射器一维成像测量。

2 面向宽带雷达接收的光子模数转换样机架构

图 1 为宽带雷达目标探测的原理示意图。通过微波光子技术^[12]产生了带宽为 4 GHz 的 LFM 信号,起始频率可以设置为 8 GHz 和 33 GHz,时宽为 1 μ s 或 2 μ s,所以该宽带雷达可以分别工作在 X 波段和 Ka 波段。由于宽带雷达发射信号频段不同,

其发射信号功率也不同,所以在目标探测实验中,X 波段工作模式可用于近端和远端目标测量,而 Ka 波段工作模式只进行近端目标测量。

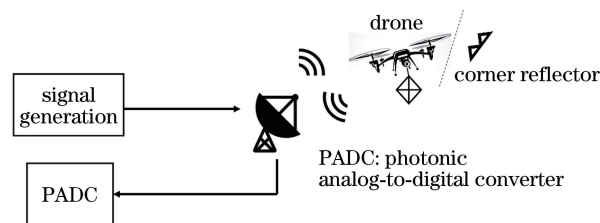


图 1 宽带雷达目标探测的原理示意图

Fig. 1 Schematic of wideband radar's target detection

图 1 中的宽带雷达回波信号接收模块由所研制的 PADC 样机构成,其可以实现宽带雷达回波信号的射频直采,然后通过匹配滤波脉冲压缩处理来获取宽带雷达目标探测的一维成像。在该宽带雷达的信号接收模块中,通过控制 PADC 样机的数据重构通道数来实现采样率的重构,从而实现不同波段雷达信号的直接采集,简化了雷达接收架构。该目标探测实验在宽带雷达的不同波段工作模式下对近距离静态角反射器和悬挂在无人机上的远距离动态角反射器进行了探测,以验证 PADC 样机的信号可重构接收能力。

该 PADC 样机的架构示意图如图 2 所示。由低噪声频率综合器驱动的主动锁模激光器(AMLL)产生重复频率为 25.6 GHz 的光脉冲序列,该光脉冲序列被用作光采样时钟,输入到宽带采样门,雷达回波信号等射频信号在采样门处被调制到光采样时钟上,完成电光采样过程。光脉冲序列经过多通道并行解复用模块后分为 8 路并行且 8 倍降速的光脉冲序列。光电转换阵列将降速后的光脉冲序列转换为电信号,之后由 8 通道同步工作的电子模数转换(EADC)阵列实现电量化,通过上位机获取输出的 8 通道比特数据流并进行交织复合和数字信号处理。

该 PADC 样机采用的多通道并行解复用模块由多级单输入、双输出调制器阵列完成。对调制器的偏置电压和驱动信号精确控制和调节后,调制器等效为输出互补的光开关,输出的光脉冲序列重复频率为输入光脉冲序列的一半^[13],使用三级调制器阵列的多通道并行解复用可实现光脉冲序列的 8 通道并行解复用。通过对 8 个并行通道进行适当选取可以重构出不同的采样率,从而适应宽带雷达的不同工作频段和不同瞬时带宽。然而,并行通道的量化过程存在通道间的失配问题,包括幅度失配和延迟失配,从而使得交织复合后数字信号的频谱存

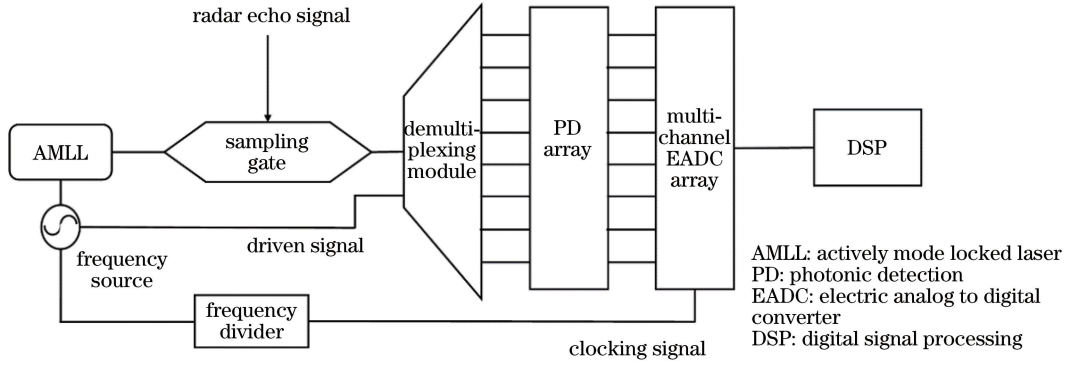


图 2 多通道并行解复用光子模数转换样机的架构示意图

Fig. 2 Schematic of multi-channel demultiplexing photonic analog-to-digital converter

在若干杂散。采用该架构的 PADC 样机应用于宽带雷达信号接收时,通道失配问题使雷达的成像结果中存在虚假目标,严重影响雷达的探测性能。本研究针对该 PADC 样机在宽带雷达信号接收中存在的通道失配问题开展研究,建立了通道失配的数学模型,给出了失配量提取和失配补偿的方法。

3 光子模数转换样机中的并行解复用通道失配补偿原理

由于该 PADC 样机多通道并行解复用架构的串并转换作用,采样门和 8 通道 EADC 阵列之间存在多个并行的通道。为了将各通道信号准确交织复合成完整的数字信号,进入后端 EADC 阵列的各通道信号必须相位同步。但 EADC 阵列在板卡级的信号量化过程中,并行通道间总存在幅度和延迟不一致的问题,使交织复合后数字信号的频谱出现失配杂散。

根据文献[10],该 PADC 样机在采集单音信号时,多通道并行解复用架构所导致的通道失配可以使用算法进行补偿,该补偿算法的关键是分析直接交织

复合的数字信号傅里叶变换(FFT)谱,通过计算 FFT 谱中的失配杂散分量来获得幅度和延迟失配量。需要注意的是,该 PADC 样机应用于宽带雷达信号(LFM 信号)接收时,直接交织复合的数字信号 FFT 谱中信号带宽内的失配杂散分量将被信号幅度淹没,无法通过频谱分析获得准确的幅度和延迟失配量^[11]。设 LFM 信号的 STFT 谱为 $S(\omega, \tau)$,通过分析 $S(\omega, \tau)$ 可以发现,在 $t = \tau$ 时, $S(\omega, \tau)$ 可以等效为频率为 ω_τ 的单音信号 FFT 谱,进而可以将 $S(\omega, \tau)$ 视作一系列不同频率单音信号 FFT 谱的组合谱。因此,通过分析直接交织复合后数字信号 STFT 谱中某一时刻的瞬时频谱,根据瞬时频谱中的失配杂散分量,可获取各个通道幅度和延迟的失配量。

根据单信号采集时的通道失配补偿理论^[10],设被采集的单音信号为 $s_{in}(t) = V_0 \cos(\omega_{in}t)$, PADC 样机的采样率为 f_s ,采样门调制器的半波电压为 V_π ,则经过 EADC 阵列并行量化后,各通道数字信号直接交织复合的结果可以表示为

$$s(k) = \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{a_n}{2} + a_n \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m J_{2m+1}(\pi V_0/V_\pi) \cos\{(2m-1)\omega_{in}[k+(n-1)+\Delta t_n/T_s]\} \right\}, \quad (1)$$

式中: N 表示 PADC 样机的通道数; k 表示离散时间点; ω_{in} 为被采集单音信号的载波频率; $\pi V_0/V_\pi$ 为采样门调制器的调制深度; J_{2m+1} 表示 $2m+1$ 阶贝塞尔函数; $T_s = 1/f_s$ 表示光采样时钟的重复周期; $a_n/2$ 表示与模拟输入信号无关的直流分量,可以通过硬件隔直(DC-block)手段对其进行去除。根据(1)式,当被采集信号为宽带雷达信号时,直接交织复合后数字信号 STFT 谱中时刻为 τ 的瞬时频谱可以表示为

$$S(\omega, \tau) = \pi \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_l^+ (-1)^{m+1} J_{2m-1}(M) \delta \left[\omega - (2m-1)\omega_\tau - \frac{2\pi k}{N} \right] + \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_l^- (-1)^{m+1} J_{2m-1}(M) \delta \left[\omega + (2m-1)\omega_\tau - \frac{2\pi k}{N} \right] \right\}, \quad (2)$$

其中有

$$\beta_l^+ = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n \exp(j\omega_\tau \Delta t_n) \exp \left[-\frac{2\pi l(n-1)}{N} \right], \beta_l^- = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n \exp(-j\omega_\tau \Delta t_n) \exp \left[-\frac{2\pi l(n-1)}{N} \right], \quad (3)$$

式中： a_n 和 Δt_n 代表第 n 个通道数字信号的幅度失配量和延迟失配量； ω_τ 表示 $S(\omega, \tau)$ 在 τ 时刻对应的瞬时频率； β_l^+ (β_l^-) 对应了 $S(\omega, \tau)$ 中位于 $\omega = l\omega_s/N \pm \omega_\tau$ 的失配杂散分量，其中 $l=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。从(2)式可以发现，调制器的非线性在 $\omega = (2m+1)\omega_\tau$ 处产生了高阶奇数次非线性杂散信号，通道失配效应则在 $\omega = l\omega_s/N \pm (2m+1)\omega_\tau$ 的频率处产生失配杂散分量，其中 $\omega_s = 2\pi f_s$ 表示该 PADC 样机采样率对应的角频率。进一步分析(3)式发现，可将其视作长度为 N 的离散傅里叶变换，则 a_n 和 Δt_n 与 β_l^+ (β_l^-) 构成了一个傅里叶变换对。因此可从 $S(\omega, \tau)$ 中的失配杂散分量来获取各个通道的幅度失配量 a_n 和延迟失配量 Δt_n 。以 β_l^+ 为例：

$$a_n = \left| \sum_{l=0}^{N-1} \beta_l^+ \exp \left[j \frac{2\pi(n-l)}{N} \right] \right|,$$

$$\Delta t_n = \frac{1}{\omega_\tau} \arg \left\{ \sum_{l=0}^{N-1} \beta_l^+ \exp \left[j \frac{2\pi(n-l)}{N} \right] \right\}。 \quad (4)$$

根据(4)式得到的幅度和延迟失配量，单通道数字信号 STFT 谱的失配补偿可以表示为

$$\tilde{S}_n(\omega, t) = \sum_{l=0}^{N-1} (1 + a_n) \exp \left(j \frac{2\pi nl}{N} \right) \times \exp \left[j \left(\omega + \frac{2\pi l}{n} \right) (1 + \Delta t_n) \right] S_n \left[j \left(\omega + \frac{2\pi l}{n} \right), t \right]。 \quad (5)$$

对 $\tilde{S}_n(\omega, t)$ 进行短时傅里叶逆变换即可获得失配补偿后的单通道数字信号，之后各并行通道的数字信号经过交织复合即可恢复为宽带的完整数字信号。

4 基于多通道失配补偿方法的宽带雷达接收实验

根据本文建立的通道失配数学模型和失配量提取算法，可得通道失配补偿的步骤如图3所示，①&.

②为将各通道数字信号直接交织复合为原始的完整数字信号；③&④为分析流程②中完整数字信号 STFT 谱中时刻为 τ 的瞬时频谱，根据瞬时频谱中的失配杂散分量，计算得到各通道数字信号的幅度失配量 a_n 和延迟失配量 Δt_n ；⑤&⑥为使用流程①中的各通道数字信号得到各单通道数字信号 STFT 谱，进而对各通道数字信号的 STFT 谱进行失配补偿并作短时傅里叶逆变换，再通过交织复合即可得到失配补偿后的完整数字信号。

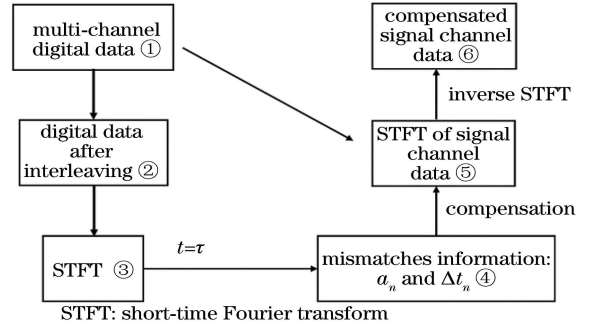


图3 通道失配补偿的工作流程图

Fig. 3 Flow chart of channel-mismatch compensation

在本文开展的目标探测实验中，当宽带雷达工作在 X 波段模式时，探测目标为两个间距为 10 cm 的近距离静止状态角反射器和一个远距离无人机挂飞的运动状态角反射器；工作在 Ka 波段模式时，探测目标为处于近距离静态的两个角反射器，间距也同样为 10 cm。分别接收 X 和 Ka 波段回波信号时，该 PADC 样机并行通道数分别为半使用(4 通道)和全使用(8 通道)，并按图3的工作流程来进行通道失配补偿。

图4(a)~(c)分别为静态和动态角反射器回波信号在单通道量化后的 STFT 谱，可以看出单通道量化的数字信号确实包含了 4 GHz 带宽的相关信

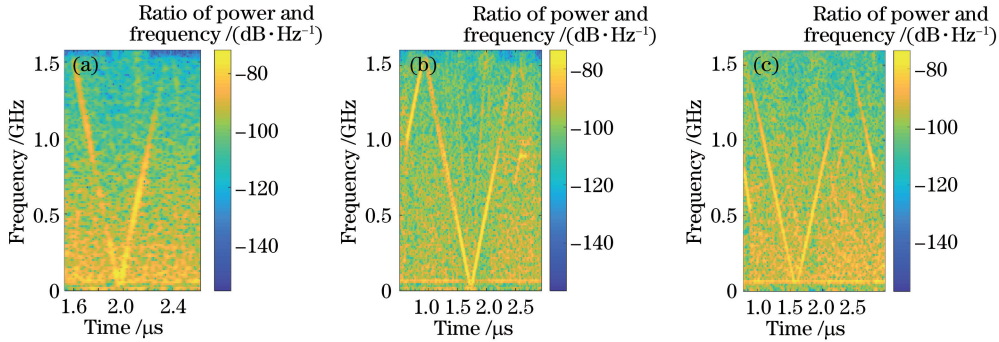


图4 不同波段信号采集时的单通道信号 STFT。(a) X 波段(静态角反射器)；

(b) Ka 波段(静态角反射器)；(c) X 波段(动态角反射器)

Fig. 4 STFT of single-channel signals for different frequency bands. (a) X-band (static corner reflectors)；

(b) Ka-band (static corner reflectors)；(c) X-band (flying corner reflector)

号成分。图 5(a)~(c)为通道失配补偿前交织复合数字信号的 STFT 谱。对比图 5(a)和 5(b)可以看出,通道数增加后,STFT 谱中的失配杂散分量也随之增加,这与本文所建立的通道失配数学模型相吻合。根据 (2) 式和 (3) 式得到各通道数字信号的幅度和延迟失配量,并根据 (5) 式进行通道失配补

偿。图 5(d)~(f)给出经过通道失配补偿后的完整数字信号的 STFT 谱,与图 5(a)~(c)对比,可以发现失配杂散分量得到有效抑制。上述结果表明本文提出的通道失配补偿算法可以准确提取出宽带回波信号的幅度和延迟失配量,还表明对宽带信号的失配补偿是有效的。

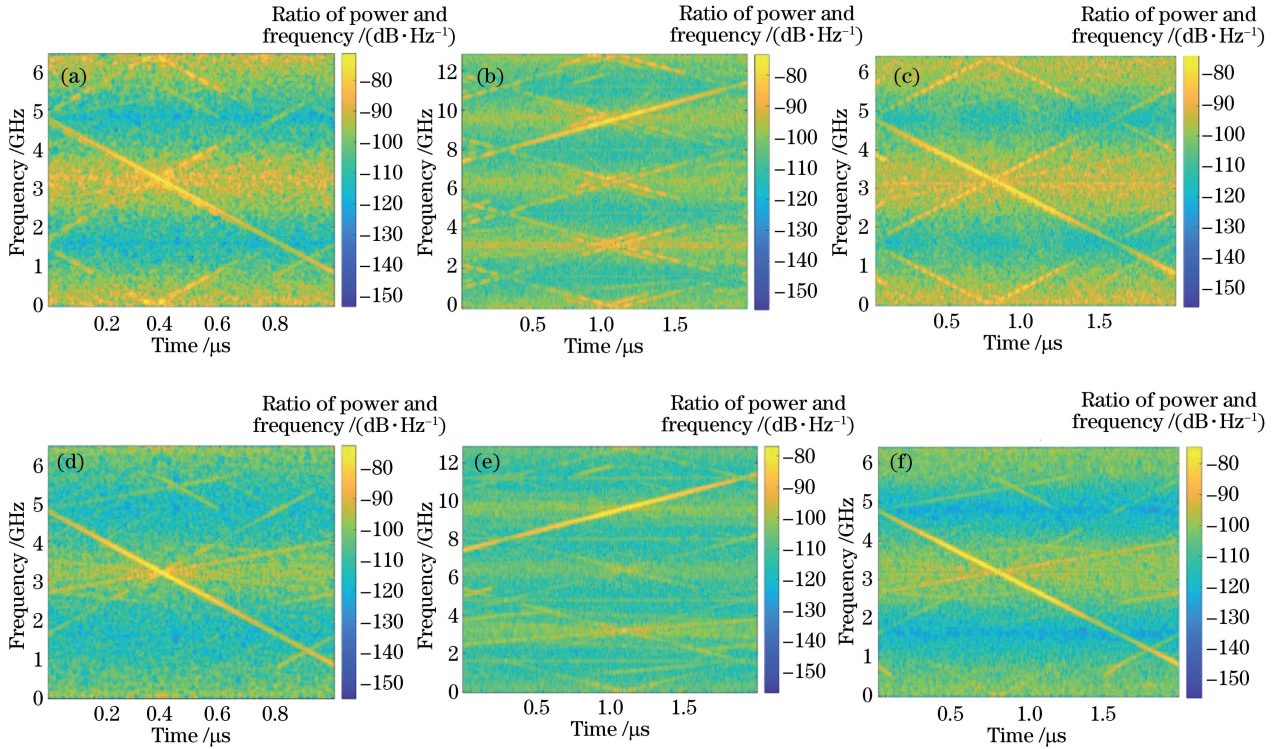


图 5 失配补偿前后交织复合的完整数字信号的 STFT 谱对比。(a)(d)补偿前和补偿后 X 波段的结果(静态角反射器); (b)(e)补偿前和补偿后 Ka 波段的结果(静态角反射器);(c)(f)补偿前和补偿后 X 波段的结果(动态角反射器)

Fig. 5 Comparison of interleaved digital data's STFT spectra before and after channel-mismatch compensation. (a)(d) Results for X-band before and after compensation (static corner reflectors); (b)(e) results for Ka-band before and after compensation (static corner reflectors); (c)(f) results for X-band before and after compensation (flying corner reflector)

图 6 为失配补偿前后经过脉冲压缩数字信号处理得到的目标探测一维成像结果对比。其中,图 6(a)和图 6(b)分别为失配补偿前后近距离静态角反射器的探测结果,可以看出失配补偿前,一维成像结果中峰值附近存在反射强度较高的虚假目标,失配补偿后,一维成像结果中虚假目标被消除,可以明显分辨出被探测目标。图 6(a)和图 6(b)中两个峰值的间距分别为 10.5 cm 和 9.75 cm。宽带雷达的分辨率可以表示为: $c/2B$, 其中 c 和 B 分别为真空中的光速和雷达发射信号的瞬时带宽。对应 4 GHz 瞬时带宽的宽带雷达分辨率,理论上应为 3.75 cm。根据一维成像结果中峰值幅度降低 3 dB 来计算,可得到该宽带雷达在 X 和 Ka 波段工作模式的分辨率分别为 4.1 cm 和 4.28 cm。实验

所测得的角反射器间距和雷达分辨率,与实际角反射器摆放的间距和理论上雷达的分辨率有微小偏差。图 6(c)为对动态角反射器的探测结果,通过失配补偿前后一维成像结果对比可以看出,失配补偿前,失配杂散分量导致一维成像结果图中近距离(25 m 左右)内出现两个反射强度很高的虚假目标,给目标分辨带来干扰,失配补偿后,虚假目标被消除。图 6(c)一维成像结果的局部放大图中有一个明显的反射点,其旁边有较弱的反射点,符合动态角反射器的实际反射特性。对比失配补偿前后完整数字信号经过脉冲压缩数字处理后的一维成像结果,可以看出本文提出的通道失配算法可以有效消除失配杂散分量在雷达一维成像中造成的虚假目标。

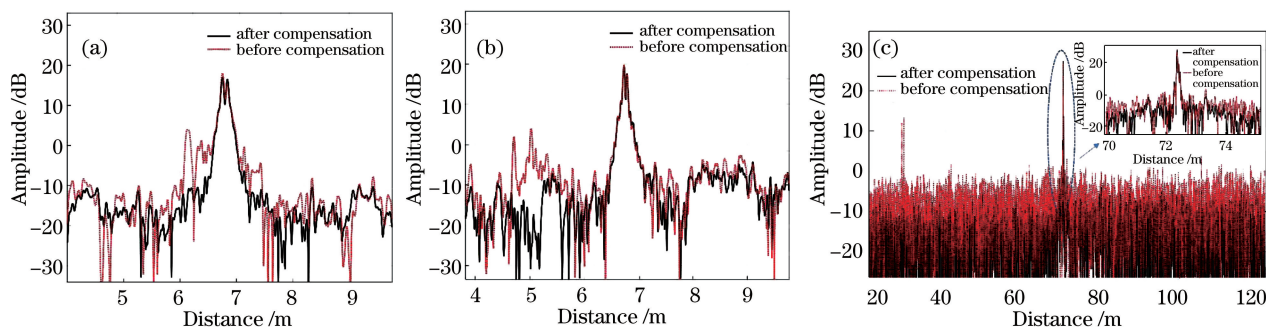


图 6 PADC 通道失配补充前后的完整数字信号经过脉冲压缩数字处理后的一维成像结果对比。(a)补偿前后 X 波段的结果对比(静态角反射器);(b)补偿前后 Ka 波段的结果对比(静态角反射器);(c)补偿前后 X 波段的结果对比(动态角反射器)

Fig. 6 One-dimensional imaging results by digital pulse compression processing before and after channel-mismatch compensated data in PADC. (a) Results comparison for X-band before and after compensation (static corner reflectors); (b) results comparison for Ka-band before and after compensation (static corner reflectors); (c) results comparison for X-band before and after compensation (flying corner reflector)

5 结 论

本文分析了多通道并行解复用架构的光子模数转换样机在宽带雷达接收时所遭遇的通道失配问题,根据宽带雷达信号 STFT 谱特性将宽带采集时的通道失配转换为单音信号采集时的通道失配,建立了通道失配的数学模型和失配补偿算法。在宽带雷达目标探测系统中,对静态和动态角反射器进行实验测试和对比分析,利用该样机的采样率可重构特性,实现对 X 波段和 Ka 波段回波信号的宽带数字化接收,有效接收的瞬时带宽达到 4 GHz 且通道失配补偿算法有效抑制了失配杂散。经过脉冲压缩数字信号处理后,准确得到静态和动态角反射器的一维成像。实验结果表明该 PADC 样机有望满足下一代宽带雷达多波段、宽带化、高分辨的应用需求。

参 考 文 献

- [1] Wepman J A. Analog-to-digital converters and their applications in radio receivers [J]. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(5): 39-45.
- [2] Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 1955-1982.
- [3] Bao W Q, Yu J L, Wang W R. High-rate optical sampling based on optoelectronic oscillator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (6): 060701.
包文强, 于晋龙, 王文睿. 基于光电振荡器的高速率光采样技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55 (6): 060701.
- [4] Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [5] Kärtner F X, Kim J, Chen J, et al. Photonic analog-to-digital conversion with femtosecond lasers [J]. Frequenz, 2008, 62(7/8): 171-174.
- [6] Deng W, Kang Z. An improved cascade all-optical quantizing scheme based on intensity-modulated label channel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (11): 1106003.
邓韦, 康哲. 采用强度调制标记信道的改进级联全光量化方案[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1106003.
- [7] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.
- [8] Yu L, Zou W W, Yang G, et al. Switching response of dual-output Mach-Zehnder modulator in channel-interleaved photonic analog-to-digital converter [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(12): 120602.
- [9] Zheng K J, Zou W W, Yu L, et al. Stability optimization of channel-interleaved photonic analog-to-digital converter by extracting of dual-output photonic demultiplexing [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(1): 012502.
- [10] Yang G, Zou W W, Yu L, et al. Compensation of multi-channel mismatches in high-speed high-resolution photonic analog-to-digital converter [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24061-24074.
- [11] Yang G, Zou W W, Yuan Y, et al. Wideband signal detection based on high-speed photonic analog-to-digital converter [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(3): 030601.
- [12] Chen W J, Zhu D, Xie C X, et al. Photonics-based reconfigurable multi-band linearly frequency-modulated signal generation [J]. Optics Express,

2018, 26(25): 32491-32499.

- [13] Zhang H J, Zou W W, Yang G, et al. Dual-output modulation in time-wavelength interleaved photonic analog-to-digital converter based on actively mode-locked laser [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14 (3): 030602.